UDC 597.551.214:[632.954+661.847 **DOI: 10.58407/bht.1.26.6**

Copyright (c) 2026 Maryna Yachna
Ця робота ліцензується відповідно до Creative Commons Attribution 4.0 International License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Марина Ячна

ЗМІНИ ДЕЯКИХ ПОКАЗНИКІВ ЛІПІДНОГО ОБМІНУ ТА АКТИВНОСТІ ЛУЖНОЇ ФОСФАТАЗИ У КОРОПА ЛУСКАТОГО (*CYPRINUS CARPIO* L.) ЗА УМОВ КОМБІНОВАНОГО ВПЛИВУ ГЕРБІЦИДІВ І СОЛЕЙ ЦИНКУ

Maryna Yachna

CHANGES IN SELECTED LIPID METABOLISM PARAMETERS AND ALKALINE PHOSPHATASE ACTIVITY IN COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO* L.) UNDER COMBINED EXPOSURE TO HERBICIDES AND ZINC SALTS

АНОТАЦІЯ

Одним зі шляхів потрапляння гербіцидів у водні екосистеми є інтенсивне застосування їх у сільському господарстві, що, в свою чергу, може призводити до взаємодії з іншими антропогенними забруднювачами, зокрема важкими металами. Тому, актуальним є вивчення сумісної дії ксенобіотиків на гідробіонтів як чутливих індикаторів екотоксикологічного стану водойм, що може відображатись на зміні біохімічних маркерів обміну речовин.

Метою роботи було оцінити сумісну дію гербіцидів: Зенкор, Раундап і 2,4-D та солей цинку на вміст загальних ліпідів, фосфоліпідів і активність лужної фосфатази у тканинах коропа (*Cyprinus carpio* L.).

Методологія. Дослідження проведено в умовах лабораторного експерименту з використанням екологічно релевантних концентрацій гербіцидів і цинку. У крові, м'язах, зябрах, печінці та тканинах головного мозку визначали вміст загальних ліпідів і фосфоліпідів, а також активність лужної фосфатази стандартними біохімічними методами. Статистичну обробку отриманих результатів проводили методами варіаційної статистики із застосуванням програмного пакета Statistica 10.0. Оцінку достовірності відмінностей між контрольною та експериментальними групами здійснювали за допомогою критерію Стьюдента (t-тесту).

Наукова новизна. роботи полягає у встановленні тканинно-специфічних особливостей змін ліпідного обміну та ферментативної активності лужної фосфатази у коропа за умов сумісного впливу гербіцидів і цинку, а також у виявленні модифікуючої ролі цинку в реалізації токсичної дії гербіцидів.

Висновки. Установлено, що сумісна дія гербіцидів і цинку спричиняє порушення ліпідного гомеостазу, дестабілізацію мембранних структур і зміни активності лужної фосфатази, які мають виражений тканинно-специфічний характер. Отримані результати свідчать про системний характер порушень перебігу біохімічних процесів і підтверджують доцільність використання показників ліпідного обміну та активності лужної фосфатази як біохімічних маркерів комбінованого антропогенного навантаження.

Ключові слова: гербіциди, цинк, короп, загальні ліпіди, фосфоліпіди, лужна фосфатаза, комбінована токсична дія

ABSTRACT

One of the main pathways by which herbicides enter aquatic ecosystems is their intensive use in agriculture, which, in turn, may lead to interactions with other anthropogenic pollutants, particularly heavy metals. Therefore, the study of the combined effects of xenobiotics on aquatic organisms, as sensitive indicators of the ecotoxicological status of water bodies, is highly relevant, as such interactions may be reflected in changes in biochemical markers of metabolism.

Purpose of the work. was to assess the combined effects of the herbicides Zencor, Roundup, and 2,4-D and zinc salts on the content of total lipids, phospholipids, and alkaline phosphatase activity in the tissues of common carp (*Cyprinus carpio* L.).

Methodology. The study was conducted under laboratory experimental conditions using environmentally relevant concentrations of herbicides and zinc. The content of total lipids and phospholipids, as well as alkaline phosphatase activity, was determined in blood, muscle, gills, liver, and brain tissues using standard biochemical methods. Statistical processing of the obtained results was carried out by methods of variational statistics using the Statistica 10.0

software package. The assessment of the reliability of differences between the control and experimental groups was carried out using the Student's criterion (t-test).

Scientific novelty. of the study lies in the identification of tissue-specific features of changes in lipid metabolism and enzymatic activity in common carp under combined exposure to herbicides and zinc, as well as in revealing the modifying role of zinc in the manifestation of herbicide toxicity.

Conclusions. It was established that the combined exposure to herbicides and zinc leads to disturbances in lipid homeostasis, destabilization of membrane structures, and changes in alkaline phosphatase activity, which exhibit a pronounced tissue-specific pattern. The obtained results indicate the systemic nature of biochemical process disturbances and confirm the feasibility of using lipid metabolism indicators and alkaline phosphatase activity as biochemical markers of combined anthropogenic impact.

Key words: herbicides, zinc, common carp, total lipids, phospholipids, alkaline phosphatase, combined toxic effects

Вступ

Сучасні агроекосистеми зазнають значного антропогенного навантаження, зумовленого інтенсивним використанням засобів хімізації сільського господарства. Гербіциди належать до найбільш поширених груп пестицидів, які широко застосовуються для контролю бур’янів і, внаслідок цього, можуть потрапляти у водні об’єкти з поверхневими дощовими стоками і талими водами, що становить небезпеку для прісноводних екосистем за токтичного впливу на гідробіонтів, зокрема риб.

У численних дослідженнях показано, що гербіциди різних хімічних класів, зокрема Зенкор, Раундап і 2,4-D, здатні порушувати перебіг біохімічних процесів у тканинах риб, впливаючи на ліпідний обмін, стан клітинних мембран та активність ферментних систем (Mekhed et al., 2012). Встановлено, що за дії гербіцидів відбуваються зміни вмісту загальних ліпідів і фосфоліпідів, а також активності ферментів, залучених до метаболічних і транспортних процесів, що свідчить про розвиток стресових реакцій організму (Poletai et al., 2010).

Водночас за реальних умов забруднення водних екосистем спостерігається вплив більш ніж одного токсиканта. Поряд із пестицидами у водоймах часто виявляють іони важких металів, зокрема цинку, який належить до біогенних мікроелементів, але за підвищених концентрацій проявляє виражені токсичні властивості. Цинк здатний взаємодіяти з білками та ліпідами клітинних мембран, змінювати активність ферментів і модифікувати перебіг метаболічних процесів у тканинах риб (Kurant & Khomenchuk, 2019).

Незважаючи на наявність значної кількості робіт, присвячених вивченню впливу гербіцидів або важких металів на гідробіонтів, питання їх сумісної дії залишається недостатньо дослідженим. Комбінований (сумісний) вплив гербіцидів і іонів важких металів може призводити до посилення токсичного ефекту або зміни механізмів дії окремих ксенобіотиків, що має важливе значення для оцінки екотоксикологічного стану водних екосистем (Lanzarin et al., 2022).

З огляду на це, актуальним є дослідження сумісної дії цинку з гербіцидами Зенкор, Раундап і 2,4-D на біохімічні показники тканин коропа (*Cyprinus carpio* L.). Аналіз змін вмісту загальних ліпідів, фосфоліпідів та активності лужної фосфатази дозволяє оцінити порушення процесів обміну ліпідів за комбінованого антропогенного навантаження.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження виконували у 2023 році в лабораторії екологічної біохімії Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка. Об’єктом експериментальних досліджень був короп лускатий (*Cyprinus carpio* L.). Для проведення експерименту відібрали 20 особин масою 250–300 г, виловлених із природної водойми – зимувального ставу ВАТ «Чернігіврибгосп».

Умови експерименту передбачали утримання риб за сумісного впливу гербіцидів і солей цинку ($ZnCl_2$). Гербіциди Зенкор (4-аміно-6-третбутіл-3-(метилтіо)-1,2,4-триазин-5(4Н)-он, діюча речовина - метрибузин), Раундап (N-фосфонометилгліцин, діюча речовина - гліфосат) та 2,4-D (2,4-дихлорфеноксиоцтова кислота) використовували у концентраціях, що відповідали рівню 2 гранично допустимих концентрацій.

Необхідні концентрації діючих речовин досягали внесенням розрахованих кіль-

костей препаратів відповідно: для Зенкору – 0,2 мл/дм^3, Раундапу – 0,04 мг/дм^3, 2,4-D – 0,0004 мг/дм^3, $ZnCl_2$ – 0,005 мг/м^3

Оцінку впливу токсикантів проводили в 200-літрових акваріумах, заповнених відстояною водопровідною водою. Щільність посадки риби становила один екземпляр на 40 дм^3 води. Температурний режим підтримували в межах +8…+10 °C, що відповідало природним умовам зимівлі. Тривалість експерименту – 14 діб.

Для біохімічного аналізу відбирали зразки крові, м'язів, зябер, печінки та головного мозку коропа лускатого. Для дослідження активності ферментів та вмісту загальних ліпідів у тканинах готували гомогенат на 0,22М сахарозі у співвідношенні 1:10. У відібраних тканинах визначали вміст загальних ліпідів, фосфоліпідів та активність лужної фосфатази. Кількісний вміст загальних ліпідів оцінювали сульфофосфованіліновим методом, фосфоліпіди – за кількістю неорганічного фосфору. Активність лужної фосфатази визначали за Гоморі. (Vlizlo et al., 2012). Дослідження проводили з додержанням вимог Директиви Європейського парламенту та Ради 2010/63/EU від 22 вересня 2010 р. про захист тварин, що використовуються для наукових цілей (European Parliament and Council, 2010).

Статистичну обробку отриманих результатів проводили методами варіаційної статистики із застосуванням програмного пакета Statistica 10.0. Оцінку достовірності відмінностей між контрольною та експериментальними групами здійснювали за допомогою критерію Стьюдента (t-тесту). Відмінності вважали статистично значущими за рівня ймовірності $p < 0,05$.

Результати дослідження та обговорення

У крові коропа за умов сумісного впливу гербіцидів та іонів цинку зафіксовано істотні зміни вмісту загальних ліпідів, характер яких залежав від типу гербіциду. Так, за дії Зенкору в поєднанні з цинком відзначено зниження рівня загальних ліпідів до 13,6 ± 1,63 г/л, що було нижчим порівняно з показниками контрольної групи (18,13 ± 1,27 г/л).

Натомість за сумісного впливу цинку і Раундапу або 2,4-D у крові риб спостерігали підвищення вмісту загальних ліпідів, який становив 21,33 ± 2,35 г/л та 18,93 ± 1,71 г/л відповідно.

Порівняльний аналіз показав, що за сумісної дії Зенкору та цинку відмічається зниження рівня загальних ліпідів у крові на 25 % відносно контролю. Водночас сумісний вплив цинку і Раундапу або 2,4-D супроводжувався підвищенням цього показника на 17 % та 4 % відповідно.

Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів у крові коропа свідчать про модифікуючу роль цинку в реалізації токсичної дії гербіцидів. Зниження рівня загальних ліпідів за дії Зенкору в поєднанні з цинком, ймовірно, пов'язане з активацією катаболічних процесів і мобілізацією ліпідних резервів. Натомість підвищення вмісту загальних ліпідів за сумісного впливу Раундапу та 2,4-D з іонами цинку може бути зумовлене порушенням транспорту й катаболізму ліпідів. Отримані результати вказують на різноспрямований характер біохімічних реакцій в організмі коропа на комбіновану дію гербіцидів і важкого металу.

У тканинах коропа за умов сумісного впливу цинку та досліджуваних гербіцидів спостерігалась тенденція до зниження загальних ліпідів в м'язах, зябрах і печінці, тоді як у тканині головного мозку, навпаки, спостерігали його підвищення. Такий тканинно-специфічний характер змін може свідчити про різну чутливість органів до комбінованої дії ксенобіотиків (табл. 1).

У м'язовій тканині мінімальні зміни вмісту загальних ліпідів відмічено за дії Зенкору в поєднанні з цинком (40,43 ± 3,23 г/л) порівняно з контролем (40,64 ± 3,66 г/л). Водночас сумісний вплив Раундапу та цинку зумовлював різке зниження рівня загальних ліпідів до 9,71 ± 0,87 г/л, що на 76 % нижче контрольних значень. За дії 2,4-D у поєднанні з цинком вміст загальних ліпідів становив 32,64 ± 2,94 г/л, що відповідало зменшенню на 20 % відносно контролю.

У тканинах зябер спостерігали подібну динаміку змін. Найбільш виражене зниження вмісту загальних ліпідів (на 34 %) відзначено за сумісного впливу 2,4-D та солей цинку (13,65 ± 1,51 г/л) порівняно з контролем (20,8 ± 1,67 г/л). За дії Зенкору з цинком цей показник зменшувався на 18 % (16,96 ± 1,36 г/л), тоді як за впливу Раундапу у поєднанні з цинком – на 10 % (18,67 ± 1,49 г/л).

Таблиця 1

Кількісний вміст загальних ліпідів в тканинах риб за сумісної дії солей Zn та гербіцидів, г/л (M±m, n=5)

Токсикант	Кров	М'язи	Зябра	Печінка	Мозок
Зенкор + Zn^{2+}	13,6 ± 1,63*	40,43 ± 3,23*	16,96 ± 1,36*	32,53 ± 2,61*	27,84 ± 2,23*
Раундап + Zn^{2+}	21,33 ± 2,35*	9,71 ± 0,87*	18,67 ± 1,49*	21,33 ± 1,71*	20,8 ± 1,67*
2,4D + Zn^{2+}	18,93 ± 1,71*	32,64 ± 2,94*	13,65 ± 1,51*	26,35 ± 2,11*	23,89 ± 1,91*
Контроль	18,13 ± 1,27*	40,64 ± 3,66*	20,8 ± 1,67*	42,99 ± 5,15*	15,15 ± 1,21*

Примітка:* – вірогідні відмінності порівняно з контролем, р< 0,05

Найбільш суттєві зміни вмісту загальних ліпідів зафіксовано в печінці – органі, що відіграє провідну роль у ліпідному обміні та процесах детоксикації. За сумісної дії Раундапу та цинку рівень загальних ліпідів знижувався до 21,33 ± 1,71 г/л порівняно з контрольним значенням 42,99 ± 5,15 г/л, тобто майже вдвічі. Дещо менш виражене зменшення показника відзначено за дії 2,4-D у поєднанні з цинком (26,35 ± 2,11 г/л; на 39 % нижче контролю), тоді як за впливу Зенкору з цинком вміст загальних ліпідів становив 32,53 ± 2,61 г/л, що на 24 % менше контрольного рівня.

На відміну від зазначених тканин, у головному мозку коропа спостерігалося підвищення вмісту загальних ліпідів за сумісної дії цинку в поєднанні з досліджуваними гербіцидами. Найбільш виражене зростання показника (на 84 %) відмічали за дії Зенкору з цинком (27,84 ± 2,23 г/л) порівняно з контролем (15,15 ± 1,21 г/л). За сумісного впливу 2,4-D та цинку рівень загальних ліпідів підвищувався на 58 % (23,89 ± 1,91 г/л), тоді як за дії Раундапу з цинком – на 37 % (20,8 ± 1,67 г/л).

Вміст загальних ліпідів в досліджених тканинах узгоджується з результатами аналізу крові, де також виявлено різноспрямовані зміни вмісту загальних ліпідів залежно від типу гербіциду. Що може свідчити про системний характер порушень ліпідного обміну за комбінованої дії цинку в поєднанні з гербіцидом. Зниження вмісту загальних ліпідів у метаболічно активних тканинах (печінка, м'язи, зябра) може відображати інтенсифікацію катаболічних процесів і мобілізацію ліпідних резервів, тоді як їх накопичення в мозку, ймовірно, пов'язане з особливостями ліпідного складу нервової тканини та обмеженими можливостями її метаболічної компенсації.

Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів у різних тканинах коропа свідчать про суттєве порушення ліпідного обміну за умов сумісної дії цинку і гербіцидів. Однак показник загальних ліпідів відображає інтегральний стан ліпідного пулу і не дозволяє повною мірою оцінити структурні зміни клітинних мембран. У зв'язку з цим наступним етапом дослідження стало вивчення вмісту фосфоліпідів – ключових компонентів мембранних структур, зміни яких можуть більш точно характеризувати мембранотоксичний ефект досліджуваних ксенобіотиків (табл. 2).

Дослідження сумісного впливу солей цинку і гербіцидів на вміст фосфоліпідів у тканинах коропа показало виражені тканинно-специфічні зміни. У крові риб спостерігалося підвищення вмісту фосфоліпідів за сумісної дії токсикантів, однак інтенсивність змін суттєво залежала від типу ксенобіотика. Найбільш виражене зростання рівня фосфоліпідів (на 51 %) спостерігали за сумісного впливу 2,4-D і цинку, де їх вміст становив 12,5 ± 1,5 г/л порівняно з 8,3 ± 0,6 г/л у контрольній групі. За дії Раундапу в поєднанні з цинком вміст фосфоліпідів підвищувався на 24 % і досягав 10,37 ± 0,83 г/л, тоді як найменше зростання показника (на 16 %) відзначено за впливу Зенкору та цинку (9,64 ± 0,77 г/л).

Таблиця 2

Кількісний вміст фосфоліпідів в тканинах риб за сумісної дії солей Zn та гербіцидів, г/л (M±m, n=5)

Токсикант	Кров	М'язи	Зябра	Печінка	Мозок
Зенкор + Zn^{2+}	9,64 ± 0,77*	22,77 ± 1,92*	15,62 ± 1,24*	12,58 ± 1,02*	13,39 ± 1,07*
Раундап + Zn^{2+}	10,37 ± 0,83*	13,88 ± 1,11*	8,35 ± 0,66*	9,75 ± 0,78*	9,41 ± 0,75*
2,4D + Zn^{2+}	12,5 ± 1,5*	7,18 ± 0,57*	15,57 ± 1,24*	9,19 ± 0,73*	4,91 ± 0,39*
Контроль	8,3 ± 0,6	16,56 ± 1,32	6,72 ± 0,53	36,16 ± 2,89	20,94 ± 1,67

Примітка:* –вірогідні відмінності порівняно з контролем, $p < 0,05$

У м'язовій тканині зміни вмісту фосфоліпідів мали різноспрямований характер. За дії Зенкору в поєднанні з цинком спостерігали підвищення рівня фосфоліпідів на 37 % відносно контролю (22,77 ± 1,92 г/л проти 16,56 ± 1,32 г/л). Натомість сумісний вплив Раундапу та цинку зумовлював зниження цього показника на 16 % (13,88 ± 1,11 г/л), а дія 2,4-D у поєднанні з цинком призводила до найбільш вираженого зменшення вмісту фосфоліпідів – на 56 % (7,18 ± 0,57 г/л).

У тканинах зябер зафіксовано підвищення вмісту фосфоліпідів за сумісної дії цинку і досліджуваних гербіцидів. Так, у контрольній групі рівень фосфоліпідів становив 6,72 ± 0,53 г/л, тоді як за дії Зенкору з цинком він зростав до 15,62 ± 1,24 г/л, що у 2,3 рази перевищувало контрольні значення. Подібний рівень фосфоліпідів (15,57 ± 1,24 г/л) спостерігали й за сумісного впливу 2,4-D та цинку. Менш виражене підвищення цього показника (на 24 %) зафіксовано за дії Раундапу з цинком (8,35 ± 0,66 г/л).

На відміну від крові, м'язів і зябер, у печінці коропа за умов сумісної дії цинку і гербіцидів спостерігали суттєве зниження вмісту фосфоліпідів порівняно з контролем (36,16 ± 2,89 г/л). Найбільше зменшення цього показника відзначено за дії Раундапу та цинку, а також 2,4-D у поєднанні з цинком – на 73 % (9,75 ± 0,78 г/л) та 74 % (9,19 ± 0,73 г/л) відповідно. За дії Зенкору з цинком рівень фосфоліпідів у печінці знижувався на 65 % і становив 12,58 ± 1,02 г/л.

Подібна тенденція зниження вмісту фосфоліпідів спостерігалась і в тканинах головного мозку. Найбільш виражені зміни зафіксовано за сумісної дії 2,4-D та цинку, де рівень фосфоліпідів зменшувався на 76 % (4,91 ± 0,39 г/л) порівняно з контролем (20,94 ± 1,67 г/л). За дії Раундапу з цинком вміст фосфоліпідів знижувався на 55 % (9,41 ± 0,75 г/л), тоді як найменше зменшення (на 36 %) відзначено за впливу Зенкору та цинку (13,39 ± 1,07 г/л).

Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів і фосфоліпідів у тканинах коропа за умов сумісної дії гербіцидів і цинку свідчать про порушення ліпідного метаболізму, зокрема фосфоліпідів, що може вплинути на функціонування клітинних мембран. Оскільки функціонування мембран тісно пов'язане з комплексами інтегральних білків, доцільним було подальше дослідження активності лужної фосфатази – чутливого біохімічного маркера мембранної проникності та метаболічного стану клітин.

При дослідженні активність лужної фосфатази за дії солей цинку у поєднанні з гербіцидами було з'ясовано, що частіше сумісна дія цинку і гербіцидів призводить до зменшення активності лужної фосфатази у різних тканинах риб. Досліджуючи активність ЛФ у крові коропа виявили наступне. Найбільшу зміну активності фіксували за дії Раундапу у поєднанні з цинком – 84 % зменшення активності відносно контролю (41,3 ± 3,3 од. акт. проти 261,9 ± 20,9 од. акт.), за дії Зенкору та цинку зменшення на 74 % – показник активності ферменту становив – 68,9 ± 8,2 од. акт, за дії 2,4-D та цинку – 124,1 ± 9,9 од. акт., що на 53 % менше за контрольні показники.

У тканинах м'язів спостерігали підвищення активності ферменту за дії Зенкору та цинку, а також Раундапу та цинку в однаковій мірі – на 73% відносно контрольної

групи. Активність ферменту становила – 261,9 ± 20,9 од. акт, проти контролю – 151,6 ± 12,1 од. акт. За дії 2,4-D та цинку ензимна активність зменшувалась до 69,9 ± 4,8 од. акт., що на 54 % менше за показник контролю.

Таблиця 3

Активність лужної фосфатази в тканинах риб за сумісної дії солей Zn та гербіцидів, од. акт. (M±m, n=5)

Токсикант	Кров	М'язи	Зябра	Печінка	Мозок
Зенкор + Zn^{2+}	68,9 ± 8,2*	261,9 ± 20,9*	124,1 ± 9,9*	1640,4 ±82,1*	68,92 ± 4,13*
Раундап + Zn^{2+}	41,3 ± 3,3*	261,9 ± 28,8*	68,92 ± 4,8*	41,3 ± 3,3*	41,3 ± 3,7*
2,4D + Zn^{2+}	124,1 ± 9,9*	69,9 ± 4,8*	68,9 ± 6,2*	68,9 ± 5,5*	68,9 ± 7,5*
Контроль	261, 9 ± 20,9	151, 6 ± 12,1	195,5 ± 11,5	261,9 ± 31,4	1089,1 ± 87,1

Примітка:* –вірогідні відмінності порівняно з контролем, р< 0,05

У тканинах зябер спостерігали зменшення ферментативної активності за дії цинку та гербіцидів у рівній мірі. Активність ферменту у контрольній групі становила – 195,5 ± 11,5 од. акт., в той час як за дії Зенкору та цинку – 124,1 ± 9,9 од. акт., за дії Раундапу та цинку, 2,4-D та цинку показник становив – 68,92 ± 4,8 од. акт, та 68,9 ± 6,2 од. акт. відповідно, що у відсотковому співвідношенні є меншим від контролю на 28-29 %.

У тканинах печінки спостерігалося збільшення активності лужної фосфатази за дії Зенкору та цинку – 1640,4 ±82,1 од. акт., у контрольній групі – 261,9 ± 31,4 од. акт., що перевищує показник контролю (більш ніж у 6 разів). Натомість, за дії Раундапу та цинку активність ферменту зменшувалась до 41,3 ± 3,3 од. акт, що на 84 % менше ніж у контролі. За дії 2,4-D та цинку активність ферменту становила 68,9 ± 5,5 од. акт., що на 74 % менше від контролю.

У тканинах мозку спостерігали зменшення за сумісної дії солей цинку та гербіцидів. Спостерігалося зменшення показника на 94-96 %. Активність ферменту у контрольній групі – 1089,1 ± 87,1 од.акт. За дії Зенкору та цинку – 68,92 ± 4,13 од.акт., за впливу Раундапу та цинку – 41,3 ± 3,7 од.акт, за дії 2,4-D та цинку – 68,9 ± 7,5 од. акт.

Дослідження активності лужної фосфатази у тканинах коропа за сумісного впливу солей цинку і гербіцидів виявило переважно інгібувальний механізм впливу ксенобіотиків, який мав чітко виражену тканинну специфічність. У більшості випадків комбінована дія цинку і гербіцидів призводила до зниження активності ферменту, що може свідчити про порушення мембранозалежних метаболічних процесів.

Отримані результати свідчать, що лужна фосфатаза є високочутливим біохімічним маркером комбінованого токсичного впливу цинку і гербіцидів. Зниження активності ферменту в крові, зябрах і мозку може відображати дестабілізацію мембранних структур, порушення транспортних процесів і пригнічення метаболічної активності клітин. Водночас різке підвищення активності лужної фосфатази в печінці за дії Зенкору та цинку, ймовірно, має компенсаторний характер і пов'язаний з активацією тканино-специфічних детоксикаційних механізмів. Загалом, тканинно-специфічні зміни активності лужної фосфатази свідчать про комплексний характер порушень метаболічних процесів за умов сумісного впливу важкого металу і гербіцидів.

Комплексний аналіз змін вмісту загальних ліпідів, фосфоліпідів та активності лужної фосфатази у тканинах коропа за умов сумісного впливу солей цинку і гербіцидів свідчить про глибокі порушення метаболізму ліпідів та мембранозалежних процесів. Виявлені зрушення мали виражений тканинно-специфічний характер і залежали як від типу гербіциду (в поєднанні з токсичним впливом цинку), так і від особливостей перебігу біохімічних процесів у досліджуваних тканинах.

Висновки

Отримані результати свідчать, що сумісний вплив солей цинку і гербіцидів Зенкору, Раундапу і 2,4-D спричиняє комплексні порушення метаболізму ліпідів і мембранозалежних процесів у тканинах коропа. Виявлені зміни вмісту загальних ліпідів характеризуються вираженою тканинною специфічністю і відображають перерозподіл ліпідних ресурсів за умов комбінованого токсичного навантаження.

Зміни фосфоліпідного складу тканин можуть свідчити про порушення функціонування мембраних структур: порушення синтезу та оновлення компонентів мембран, що має тканино-специфічний характер. Різноспрямовані зрушення фосфоліпідного обміну підтверджують різну чутливість тканин коропа до дії ксенобіотиків і роль мембранозалежних процесів у формуванні відповіді на токсиканти.

Активність лужної фосфатази виявилася чутливим біохімічним маркером комбінованого впливу цинку і гербіцидів. Її інгібування у крові, зябрах і тканинах головного мозку відображає пригнічення мембранозалежних ферментативних процесів, тоді як зміни активності в печінці та м'язах мають ознаки адаптаційно-компенсаторних реакцій, пов'язаних із залученням детоксикаційних механізмів.

У сукупності результати дослідження підтверджують, що цинк виступає важливим модифікуючим чинником токсичної дії гербіцидів, спричиняючи різні тканино-специфічні метаболічні відповіді у організмі коропа. Комплексні порушення показників загальних ліпідів, фосфоліпідів та активності лужної фосфатази можуть бути використані як інформативні біохімічні маркери екотоксикологічного стану прісноводних екосистем за умов комбінованого антропогенного навантаження.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Набір даних доступний за запитом до автора / Dataset available on request from the author.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Експериментальні процедури були схвалені Комісією з біоетики Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка (№ протоколу: 5, 3 жовтня 2024 р., Чернігів, Україна) / The experimental procedures were approved by the Bioethics Committee of T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium» (Protocol Number: 5, 3 October 2024, Chernihiv, Ukraine).

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів / The author declares no conflicts of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI-enabled technologies to collect, analyze, or interpret data.

References

Mekhed, O. B., Tretiak, O. P., & Derkach, S. M. (2012). Changes in the activity of some catabolic enzymes of carp (*Cyprinus carpio* L.) in short-term cell culture and at the organism level under toxic effects of herbicides. *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Theoretical and Practical Ichthyology"*. (in Ukrainian)

Мехед О. Б., Третяк О. П., Деркач С. М. Зміни активності деяких ферментів катаболізму коропа (*Cyprinus carpio* L.) у короткочасній культурі клітин та на рівні організму риб за токсичного впливу гербіцидів. Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. 2012.

Poletai, V. M., Veselskyi, S. P., & Yanchuk, P. I. (2010). Effects of herbicides on lipid intermediate metabolism in carp. *Visnyk of Cherkasy University. Series: Biological Sciences*, *184*, 110–114. (in Ukrainian)

Полетай В. М., Весельський С. П., Янчук П. І. Вплив гербіцидів на проміжний обмін ліпідів в організмі коропа. *Вісник Черкаського університету. Серія: Біологічні науки*. 2010. Вип. 184. С. 110–114.

Kurant, V. Z., & Khomenchuk, V. O. (2019). Influence of manganese, zinc, copper and lead ions on the content of free amino acids in carp organism. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, *75*(1), 28–42. https://doi.org/10.25128/2078-2357.19.1.4 (in Ukrainian)

Курант В. З., Хоменчук В. О. Вплив іонів мангану, цинку, купруму та плюмбуму на вміст вільних аміно-кислот в організмі коропа. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2019. Т. 75, № 1. С. 28–42. https://doi.org/10.25128/2078-2357.19.1.4

Lanzarin, G. A. B., Venâncio, C. A. S., Félix, L. M., & Monteiro, S. M. (2022). Evaluation of the developmental effects of a glyphosate-based herbicide complexed with copper, zinc, and manganese metals in zebrafish. *Chemosphere*, *308*, 136430. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136430

Vlizlo, V. V., Fedoruk, R. S., Ratych, I. B., et al. (2012). *Laboratory methods of research in biology, animal husbandry and veterinary medicine* (V. V. Vlizlo, Ed.). Lviv: SPOLOM. 764 p. (in Ukrainian)

Влізло В. В., Федорук Р. С., Ратич І. Б. та ін. Лабораторні методи досліджень у біології, тваринництві та ветеринарній медицині: довідник / за ред. В. В. Влізла. Львів: СПОЛОМ, 2012. 764 с.

European Parliament and Council. (2010). Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes. Official Journal of the European Union, L 276, 33–79. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0063

Received: 10.02.2026.**Accepted:** 12.03.2026.**Published:** 06.04.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Ячна М. Зміни деяких показників ліпідного обміну та активності лужної фосфатази у коропа лускатого (*Cyprinus carpio* L.) за умов комбінованого впливу гербіцидів і солей цинку. *Biota. Human. Technology.* 2026. № 1. С. 73-80. DOI: https://doi.org/10.58407/bht.1.26.6

Cite this article in APA style as:

Yachna, M. (2026). Zminy deiakykh pokaznykiv lipidnoho obminu ta aktyvnosti luzhnoi fosfatazy u koropa luskatoho (*Cyprinus carpio* L.) za umov kombinovanoho vplyvu herbitsydiv i solei tsynku [Changes in selected lipid metabolism parameters and alkaline phosphatase activity in common carp (*Cyprinus carpio* L.) under combined exposure to herbicides and zinc salts]. *Biota. Human. Technology,* (1), 73-80. https://doi.org/10.58407/bht.1.26.6 (in Ukrainian)

Information about the authors:

Yachna M. [*in Ukrainian:* Ячна М.] [1], Senior lecturer, email: m_yachna@ukr.net
ORCID: 0000-0003-4587-525X
Department of Biology and Human Health, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine